干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2020.03.01

基于流域的陕西省水资源承载力研究①

夏玮静[1,2]， 王宁练[1,2]， 沈 月[3]

（1 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室，陕西 西安 710127；
2 西北大学城市与环境学院/地表系统与灾害研究院，陕西 西安 710027；
3 西安交通大学公共政策与管理学院，陕西 西安 710049）

摘 要： 以陕西省9个流域为评价单元，基于宏观指标和综合指标构建水资源承载力综合评价模型。通过分析经济压力、人口压力、承载压力及协调指数，进而对研究区水资源承载力进行评价并探讨其时空分布特征。结果表明：(1) 陕西各流域水资源承载力差异较为明显，其中陕南最大，陕北次之，汉中最小。陕南地区的汉江和嘉陵江两个流域水资源丰富且降水充足，$WI<0.6$ 处于承载适宜阶段，但该流域水资源利用效率较低 $HI<0.6$，流域人均用水量、万元 GDP 用水量以及农田灌溉亩均用水量均超过全省平均水平。陕北地区的河口—龙门、内流区以及北洛河三个流域水资源紧缺且存在水质性缺水问题，处于轻度超载阶段；而关中地区的渭河、泾河、龙门三门峡及伊洛河四个流域水资源供需矛盾随着人口与经济的增长进一步加剧，水资源承载力综合评价指标值 $WI>1.5$，处于严重超载阶段。(2) 从承载压力指数分析可以看出，流域调水对缺水地区或经济中心城市的发展起到决定性作用。从丰水流域跨流域调水能解决地区性缺水问题，进而解决水资源危机所带来的社会经济可持续发展问题。(3) 基于水资源的自然资源属性，以流域为评价单元，其研究结果更符合自然规律，有利于实现流域间水资源的合理均衡和分配。

关 键 词： 水资源；水资源承载力；陕西省；流域
文章编号

水资源是基础性自然资源和战略性经济资源[1-2]。随着人口增长和社会经济发展，城镇化、工业化进程的加快以及城乡居民生活水平的提高[3]，水资源短缺和水环境恶化形势日益严峻已成为全球性问题[4]，全球近 2.4×10^9 人的用水无法得到保障，近 4.0×10^9 人面临缺水问题[5-6]。中国人均水资源占有量不足世界人均水平的1/4[7]，西北地区作为水资源紧短地区之一，其资源性缺水和水质性缺水问题突出[8]。解决水资源供需问题，加强流域可利用水资源管理，以保障社会经济可持续发展，是当前亟待需要解决的问题。

水资源承载力作为评价区域水资源的一个基本度量，是衡量水资源紧缺地区可持续发展的决定性指标[2,9]。评估地区水资源承载力，有助于合理利用水资源并促进地区社会经济绿色发展。国际上一般将水资源承载力纳入区域规划以及可持续发展研究中[10-13]，目前国内对水资源承载力的研究，主要从水资源供需平衡角度或影响水资源承载力因素方面进行现状评价或承载预测。前者[14-16]能反映水资源的供需状况，但对水资源与社会-经济-环境复合系统之间的联系考虑较少；后者是国内学者研究的热点[17-20]，但只能得出一个较全面的承载能力的判断，无法直接反映水资源所承载的社会经济或人口规模大小。因此本研究以陕西省9个二级流域为研究区，从宏观指标和综合指标两方面构建水资源承载力综合评价模型，对水资源系统的承载力进行综合评价分析，以期对其水资源开发利用和社会经济可持续发展提供决策依据。

① **收稿日期：** 2019-06-14； **修订日期：** 2019-10-31
基金项目： 国家重点研发计划项目(2017YFC0404302)资助
作者简介： 夏玮静(1994-)，女，硕士研究生. E-mail: swdyihehe@qq.com
通讯作者： 王宁练(1966-)，男，博士，教授，研究方向为冰冻圈与全球变化. E-mail: nlwang@nwu.edu.cn

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

陕西地处中国西北部，位于105°29′~111°15′E和31°42′~39°35′N之间，面积约2.056×10^5 km^2，属于水资源紧缺省份，水资源表现为总量不足，时空分布严重不均[21]。以秦岭为界，秦岭以北的黄河流域主要包括闭流区、河口—龙门、北洛河、泾河、渭河和伊洛河7个二级流域，总面积占全省总面积的64.83%，经济总量占全省比重高达90%，但水资源量仅占全省的32.16%；而秦岭以南的长江流域水资源丰富，主要包括嘉陵江和汉江2个二级流域，水资源占全省总量的67.84%，但面积仅占全省总面积的35.17%（图1）。2016年陕西省水资源总量为2.714×10^{10} m^3，人均水资源量为713.34 $m^3\cdot$人$^{-1}$，低于全国平均水平（2 348.03 $m^3\cdot$人$^{-1}$）。陕西省各流域的水资源分布：从2010—2016年来看（图2），汉江、嘉陵江和渭河流域水资源总量相比其他流域要丰富；泾河、北洛河、伊洛河、龙门—三门峡（直）、和闭流区流域的水资源量相对较少。总体上来看，显示出南多北少的空间分布特征。人均水资源占有量：从2016年来看（图3），嘉陵江、汉江和闭流区流域人均水资源量较高，龙门—三门峡（直）和渭河两个流域人均水资源量明显小于其他流域。其中渭河流域人均水资源量最小，只有188.62 $m^3\cdot$人$^{-1}$，远低于全省平均水平（713.34 $m^3\cdot$人$^{-1}$）。从空间分布上来看，陕西流域人均水资源量显示出南多北少中部最低的空间分布特征。

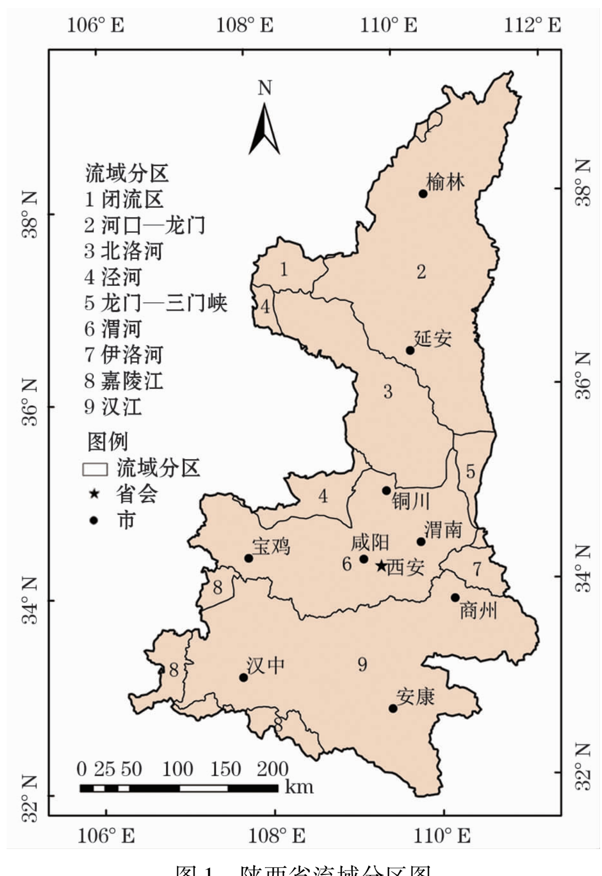


图1 陕西省流域分区图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

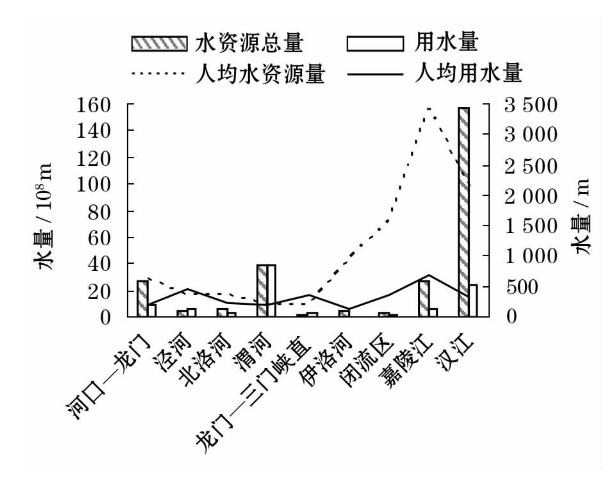


图2 陕西各流域水资源现状

Fig. 2 Current situation of water resources in river basins of Shaanxi Province

1.2 数据资料来源

研究数据来自于陕西省《水资源公报》、省及各市《统计年鉴》以及各县《国民经济和社会发展统计公报》等，并经过计算整理获得。水资源数据包括水资源总量、可利用水资源量等统计数据，为消除偶然因素的影响，水资源总量采用多年平均值[22]。

2 综合评价模型

水资源问题不仅是生态环境问题，也是关系到国家安全的社会、经济和政治问题[23-25]。确保水资源的高效、科学利用，是实现地区可持续发展的重要前提条件[26]。水资源承载力作为评价水资源安全和可持续利用的一个基本度量，其评价模型应能回答以下问题：水资源的供需平衡状况、承载状况及其与社会经济生态系统之间的协调状况，并能反映水资源所承载的社会经济或人口规模大小。本文从宏观指标和综合指标两方面构建水资源承载力综合评价模型，其中宏观指标反映的是流域水资源承载力的大小；综合指标反映的是水资源开发利用是否合理协调以支持地区可持续发展。也就是说，水资源承载力包括三个方面：水资源承载力的大小、所处的

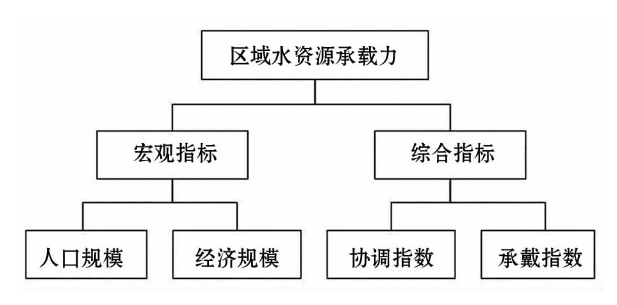


图 3 水资源承载力研究框架

Fig. 3 Research framework of water resources carrying capacity

承载状态和协调状况,三者相辅相成,使地区水资源承载力得到正确、全面的评价(图 3)。

2.1 指标体系设计

指标体系是水资源承载力评价的重要标准和依据,指标的选取应遵循科学性、整体性、代表性、数据可获得性原则。根据上述原则,本研究参考水资源承载力评价中使用频率较高的指标,并结合承载指数和协调指数的内涵及特征,建立陕西省水资源承载力综合评价指标体系。指标体系分为 2 个目标层,共 21 个评价指标(表 3)。其中,水资源系统选取人均水资源量、供水模数、产水模数、水资源开发利用率 4 个指标表征水资源的丰裕程度,反映地区水资源的自然支撑情况;社会系统选取人口密度、城镇化水平、人口自然增长率、生活用水定额,经济系统选取人均 GDP、GDP 增长率、第三产业比重、农业产值密度、农田灌溉用水率、工业用水率,生态系统选取生态环境用水率、人均公园绿地面积、污水处理率,13 个指标来表征水资源受到外界压力的程度,反映地区社会经济生态复合系统发展对水资源带来的压力;协调系统选取人均用水量、万元 GDP 用水量、单位面积粮食产量和万元农业增加值用水量 4 个指标表征水资源开发利用与社会经济发展之间的协调程度。

指标权重是影响评价结果的关键,本研究采用熵权法来计算水资源承载力综合指标中各系统内各项指标的权重。熵权法是确定客观权重的常用方法,可以较好避免主观判断可能造成的人为因素影响。信息轮中如果指标的信息熵越小,该指标提供的信息量越大,指标权重越大,即由综合评价指标构成的判断矩阵来确定指标权重,使评价结果更符合实际[27]。其具体步骤如表 1 所示。

表 1 熵值法确定指标权重

Tab. 1 Method of entropy values determines index weighing

步骤	公式	参数说明
①对各指标进行标准化处理	正向指标:$X'_{ij}=\frac{X_{ij}-\min\{X_j\}}{\max\{X_j\}-\min\{X_j\}}$ 负向指标:$X'_{ij}=\frac{\max\{X_j\}-X_{ij}}{\max\{X_j\}-\min\{X_j\}}$	X'_{ij} 为指标标准化值
②计算第 i 区域第 j 项指标的比重	$Y_{ij}=\frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}X'_{ij}}$	m 为指标所在区域,本研究选取陕西 97 个县的数据
③计算指标信息熵	$e_j=-k\sum_{i=1}^{m}(Y_{ij}\times\ln Y_{ij})$	$k=1/\ln(m)$
④确定子系统中各指标权重	$W_i=(1-e_j)/\sum_{j=1}^{n}(1-e_j)$	

2.2 水资源承载力模型构建

基于宏观指标和综合指标通过分析经济压力指数、人口压力指数、承载压力指数及协调指数构建评价模型。有效分析地区水资源承载力大小、所处的承载状态和协调状况。水资源承载力综合评价模型计算公式:

$$WI=\sqrt[3]{(\alpha F_pI+\beta F_EI)\times B_pI\times(1-HI)} \tag{1}$$

式中:WI 为水资源承载力综合评价指数;α、β 为人口压力指数和经济压力指数所代表的水资源承载大小的权重,α、β 各取值 0.5[5]。水资源承载力综合评价指数分级参考已有的研究结果[5,8],将承载等级分为 5 级,即承载盈余、承载适宜、濒临超载、轻度超载、严重超载,分级标准和临界值依据研究区的特征分为 5 级(表 2)。

2.3 宏观指标

(1)水资源承载人口压力指数计算公式为:

$$F_pI=\frac{P}{P_{\mathrm{Max}}} \tag{2}$$

表 2 水资源承载力综合评价指数分级

Tab. 2 Classification of water resources carrying capacity comprehensive evaluation index

WI	0.00~0.50	0.51~0.80	0.81~1.20	1.21~1.50	>1.5
承载等级	承载盈余	承载适宜	濒临超载	轻度超载	严重超载
承载状态	水资源丰裕	水资源利用协调	水资源利用轻度不协调	水资源短缺	水资源严重缺乏

式中：$P_{Max} = \frac{W \times a}{pop}$为水资源能承载的最大人口规模；其中 W 为水资源总量；a 为当前社会经济条件下为水资源开发利用系数；pop 为人均用水量。

（2）水资源承载经济压力指数计算公式为：

$$F_E I = \frac{GDP}{GDP_{Max}} \tag{3}$$

式中：$GDP_{Max} = \frac{W \times a}{gdp}$为水资源能承载的最大经济规模；其中 W 为水资源总量；a 为当前社会经济条件下为水资源开发利用系数；gdp 为万元 GDP 用水量[28]。

2.4 综合指标

（1）承载压力指数 B_pI 描述的是流域内"水资源－社会－经济－环境"复合系统发展所承载的压力[29]，计算公式为：

$$B_pI = \frac{PI}{SI} \tag{4}$$

式中：PI 表示"水资源—社会—经济—环境"复合系统的压力指数；SI 为其承压指数。

承压指数计算公式为：

$$SI = \sum_i^n \omega_{si} X_i \tag{5}$$

压力指数计算公式为：

$$PI = \sum_i^n \omega_{pi} X_i \tag{6}$$

式中：ω_{si}、ω_{pi}为评价指标的权重；X_i为评价指标标准化后的值。选取水资源系统 A_1 的各项指标计算承压指数，选取社会系统 A_2、经济系统 A_3 和生态环境系统 A_4 的各项指标[30]计算压力指数。

（2）协调指数 HI 反映地区水资源利用效率与水资源—社会可持续发展的状态，计算公式为：

$$HI = \sum_i^n \omega_{hi} X_i \tag{7}$$

式中：ω_{hi}为评价指标的权重；X_i为评价指标标准化后的值。

3 结果分析

采用水资源承载力综合评价模型对陕西省 9 个二级流域 2010 年和 2016 年的人口压力指数、经济压力指数、承载压力指数和协调指数去分析其水资源承载力的大小、所处的承载状态和协调状况（图 4），并最终得出各流域水资源综合承载力的评价结果（图 5）。

表 3 水资源承载力综合指标设计

Tab. 3 Comprehensive index design of water resources carrying capacity

目标层	准则层	指标层	计算方法	选取意义	权重
承载力指数	水资源系统 A_1	人均水资源量 L_1	当前水资源量/总人口	反映水资源丰、缺状态	0.425
		供水模数 L_2	供水量/区域面积	反映单位面积供水能力	0.357
		产水模数 L_3	水资源总量/区域面积	反映水资源量大小	0.212
		水资源开发利用率 L_4	供水量/水资源总量	反映水资源开发及利用程度	0.006
	社会系统 A_2	人口密度 L_5	总人口/区域面积	反映人口的聚集程度	0.247
		城镇化水平 L_6	城镇人口/总人口	反映城镇化程度	0.040
		人口自然增长率 L_7	人口自然增长量/总人口	反映人口增长的趋势	0.028
		生活用水定额 L_8	生活用水量/总人口/365	反映节水状况	0.023
	经济系统 A_3	人均 GDPL_9	GDP 总量/总人口	反映区域经济发展状况	0.113
		GDP 增长率 L_{10}	GDP 增长额/GDP 总量	反映区域整体发展能力	0.010
		第三产业比重 L_{11}	第三产业 GDP/GDP 总量	反映区域经济结构优化程度	0.015
		农业产值密度 L_{12}	农业 GDP 总量/区域面积	反映地区农业发展水平	0.167
		农田灌溉用水率 L_{13}	农业灌溉用水/用水总量	反映地区农业灌溉发展水平	0.034
		工业用水率 L_{14}	工业用水/用水总量	反映地区工业用水水平	0.081
	生态系统 A_4	生态环境用水率 L_{15}	生态环境用水量/用水量	反映生态环境的保障程度	0.144
		人均公园绿地面积 L_{16}	公园绿地面积/总人口	反映区域绿化水平	0.059
		污水处理率 L_{17}	污水处理量/污水排放量	反映城市污水处理能力	0.039
协调指数	协调系统 A_5	人均用水量 L_{18}	用水量/总人口	反映地区人口生产、生活用水水平	0.156
		万元 GDP 用水量 L_{19}	用水量/GDP 总量	反映水资源与经济的协调度	0.175
		单位面积粮食产量 L_{20}	粮食总产量/粮食播种面积	反映区域农业生产与水资源的协调性	0.386
		万元农业增加值用水量 L_{21}	统计数据	反映区域农业用水、节水水平	0.284

3.1 人口压力指数与经济压力指数分析

水资源人口、经济压力指数 F_PI 、F_EI 表征地区水资源所承载的人口、经济规模压力,数字越大则表明该地区水资源所承载的人口、经济规模压力越大。陕西各流域2010年和2016年水资源承载人口压力指数和经济压力指数如图4a、4b所示。可以看出,水资源地区分布与生产力布局和人口集中分布地区不相匹配。

从空间分布上看,全省水资源人口、经济压力呈现中部高、两边低的分布格局。F_PI >1 和 F_EI >1 主要集中在渭河、泾河和龙门—三门峡流域,该部分流域属于人口集中分布地区以及工业聚集区,社会经济发展迅速,水资源供需矛盾也随着人口与经济的增长进一步加剧,从而使水资源所承载的人口压力和经济压力始终较大。渭河、泾河和龙门—三门峡三个流域2016年人口 2.3×10^7 人,占全省人口60.4%,而各流域人均水资源量分别为188.62 $m^3\cdot人^{-1}$、352.97 $m^3\cdot人^{-1}$和197.69 $m^3\cdot人^{-1}$,远低于全省人均水资源量(713.34 $m^3\cdot人^{-1}$)。陕南的汉江和嘉陵江流域由于水资源总量丰富,水资源所承载的经济和人口压力一直较低,2016年人均水资源量分别是2 131 $m^3\cdot人^{-1}$、3 436 $m^3\cdot人^{-1}$。从时间变化上看,陕北地区各流域水资源承载经济压力指数和人口压力指数明显改善。这得益于该地区各流域水资源总量的增加,如2010年河口—龙门流域水资源量占陕西水资源总量的3.8%,2016年占陕西水资源总量的10%。虽然整体上陕北地区各流域水资源相对陕南各流域差距很大,但近年来水资源量的小幅增加对该流域可持续发展起到非常重要的作用。(图4a1 ~4b2)

3.2 承载压力指数分析

陕西各流域2010年和2016年承载压力指数如图4c1、4c2所示。从空间分布上看,2016年陕北地区的北洛河流域以及河口—龙门、泾河和内流区部分流域承载压力指数 B_PI >6,关中地区的渭河、龙门—三门峡流域以及泾河部分流域承载压力指数。两个地区的承载压力指数都大于2说明地区社会经济发展对水资源压力较大。其中陕北地区水资源总量相对匮乏,而关中地区作为全省的政治、经济和文化的中心,位于渭河、龙门—三门峡和泾河三个流域内,社会经济高速发展导致该地区水资源供需矛盾日益加剧。流域内的用水量远大于其水资源总量(图2),说明跨流域调水工程已在其中起到重要作用。陕南地区的汉江和嘉陵江流域水资源丰富,承载压力指数 B_PI 均小于2,地区社会经济发展对水资源压力较小。

从时间变化上看,北洛河流域和河口—龙门流域南半区域承载压力始终较大,说明该部分流域水资源承载的社会经济压力和其水资源承载的支持力极不协调。延安位于该部分流域,随着经济社会的发展和人民生活水平的提高对水资源的需求越来越迫切,但该地区人均水资源量375.53 $m^3\cdot人^{-1}$,低于全省平均水平(713.34 $m^3\cdot人^{-1}$);人均供水量113.64 $m^3\cdot人^{-1}$,低于全省平均水平(236.46 $m^3\cdot人^{-1}$)。水资源总量和供水量相对较低与该地区社会经济发展不协调。汉江和嘉陵江两个流域承载压力近年来有所升高,但因其充沛的水资源量依旧处于承载适宜阶段。无定河和窟野河所属的河口—龙门流域近年来由于水资源小幅增加(图2)承载压力有所减缓。

3.3 协调指数分析

水资源协调指数 反映地区水资源利用效率与水资源—社会可持续发展的状态。从图4d1、4d2可以看出,2016年所有流域协调指数 ,整体上各流域水资源与社会—经济—生态环境复合系统的协调水平不断提高。渭河和泾河两个流域随着当地经济发展,水资源利用效率不断提高 。汉江和嘉陵江两个流域水资源总量充沛,地区农业发展较好,区域经济发展类型属于高耗水型经济,虽然协调指数 HI 在时间尺度上得到了改善,但用水效率在陕西各流域中处于最低值。汉中市和安康市位于图中呈红色和橙色部分的汉江和嘉陵江两个流域内,2016年人均用水量分别为476.7 $m^3\cdot人^{-1}$、273.9 $m^3\cdot人^{-1}$;万元GDP用水量分别为142.0 $m^3\cdot万元^{-1}$、85.4 $m^3\cdot万元^{-1}$;农田灌溉亩均用水量分别为864 $m^3\cdot亩^{-1}$、734 $m^3\cdot亩^{-1}$,均大大超过全省平均水平(人均用水量238.2 $m^3\cdot人^{-1}$,万元GDP用水量分别为47.4 $m^3\cdot万元^{-1}$,农田灌溉亩均用水量分别为312 $m^3\cdot亩^{-1}$),水资源利用效率极低。北洛河流域部分区域协调指数 HI 呈明显增大趋势,是全省协调指数最高的区域。流域内呈蓝色部分的区域是延安市的洛川和黄龙两县,单位面积粮食产量高,流域水资源相对匮乏,但水资源利用效率较高,人均用水量、万元GDP用水量和农田灌溉亩均用水量都小于全省平均水平。

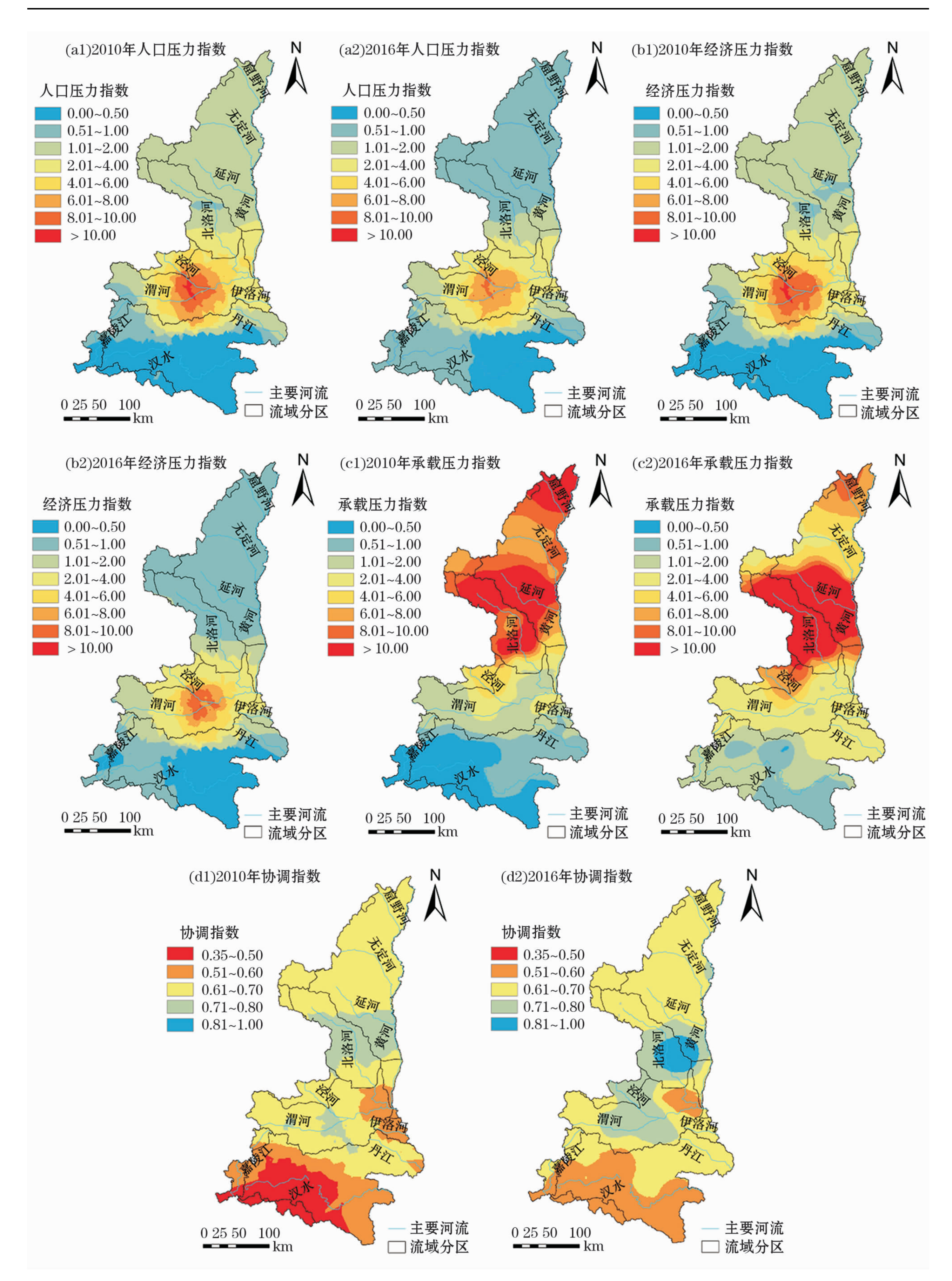


图4 陕西省水资源承载评价结果

Fig. 4 Evaluation results of water resources carrying capacity in Shaanxi Province

3.4 综合评价指数分析

从空间上看,陕西各流域水资源分布不均等,水资源供需矛盾突出。汉江和嘉陵江流域水资源承载力综合评价指数相对较低,*WI* 整体在 0~0.65 之间,水资源丰裕。依据表 3,水资源承载力在承载盈余和承载适宜两个等级上。在社会经济快速发展的阶段,水资源能够提供有力的保障。不是流域发展的瓶颈指标,但为了实现水资源的可持续发展,需要合理提高水资源利用效率[25]。渭河和泾河流域水资源承载力综合评价指数较高,*WI* 整体在 1.50 以上,处于严重超载区域。这两个流域位于关中地区,关中是全省的政治、经济和文化的中心。虽然这两个流域协调指数较高,承载指数压力较低,但人口压力巨大,水资源所承载的人口规模和经济规模已达到极限,水资源已成为阻碍该地区可持续发展的重要因素。河口—龙门和内流区流域水资源承载力综合评价指数同样较高,*WI* 整体在 1.00 以上,处于轻度超载和严重超载两个等级上。人口和经济压力较小,协调指数相对均衡,但是该地区水资源总量相对匮乏导致承载指数较高。如何更高效的利用水资源成为该地区面临的重要问题。

从时间变化上来看,汉江和嘉陵江两个流域水资源承载压力逐渐变大,但整体上还处在承载适宜阶段,水资源充沛是该部分流域的亮点。但正是因为水资源充沛,导致水资源利用率较低,2016 年汉江流域的汉中市人均用水量高达 476.7 $m^3 \cdot 人^{-1}$,是全省人均用水量的两倍。万元 GDP 用水量高达 142.0 $m^3 \cdot 万元^{-1}$,是全省平均水平的 3 倍。农田灌溉单位面积平均用水量更是高达 12 960 $m^3 \cdot hm^{-2}$,是全省平均水平的 2 倍。渭河和泾河两个流域仍处于严重超载区域,水资源利用极不协调。河口—龙门和内流区两个流域水资源承载压力逐渐变小,2016 年两个流域水资源综合评价指数 *WI* 整体在 1~1.35 之间,处于濒临超载和轻度超载两个等级上,整体上得到了改善。从图 2 可以看出来,相较于嘉陵江和汉江流域水资源总量的下降,近年来该部分流域水资源总量基本维持不变,这对原本水资源相对匮乏的区域来说是极大的改善。且该部分流域人口压力较小,协调指数相对均衡,水资源承载能力就得到了改善。

4 结论与讨论

本文基于宏观指标和综合指标构建水资源承载力模型,从流域尺度对2010年和2016年陕西省水

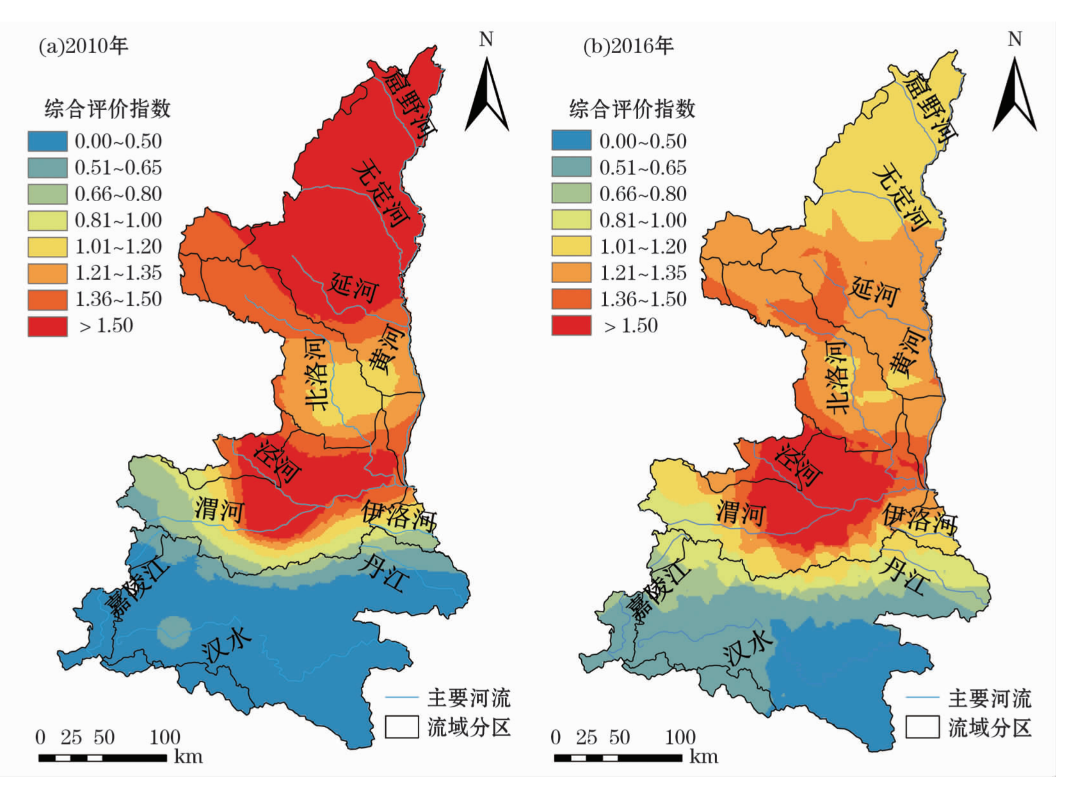


图 5 陕西省水资源承载力综合评价结果

Fig. 5 Comprehensive evaluation results of water resources carrying capacity in Shaanxi Province

资源承载力进行综合评价,主要结论如下:

(1) 陕西各流域水资源分布不均等,水资源供需矛盾突出。水资源综合承载能力差异较为明显,陕南最大,陕北次之,关中最小。

陕南地区的汉江和嘉陵江两个流域水资源丰富且降水量充足,水资源系统有力的保障了流域经济社会可持续发展。但该流域节水意识不强,水资源利用效率较低,流域人均用水量、万元 GDP 用水量以及农田灌溉亩均用水量均超过全省平均水平,应加强地区居民的节水意识,调整产业结构,提高农业用水效率,使经济向低耗水型经济转变,实现水资源的高效利用。

陕北地区的河口—龙门、内流区以及北洛河三个流域水资源相对匮乏,属资源型缺水地区,且流域内的窟野河、无定河、延河和北洛河 V 类和劣 V 类水质河长比分别是 10.11%、15.37%、42.71%、46.64%,存在水质性缺水问题。应加强生态保护,加大水资源的污染防治与监管工作,改善水资源质量,以进一步缓解水资源的供需压力。

关中地区的渭河、泾河、龙门三门峡及伊洛河四个流域,人口规模大,占全省人口 61.75%,但水资源只占全省总量 18.52%。水资源供需矛盾将会随着人口与经济的增长进一步加剧。水资源已成为限制流域内社会经济发展的重要因素,应合理控制地区人口增长,调整产业结构,加强居民节水意识,加大水利工程投资力度,同时积极推进跨流域调水工程建设,以缓解水资源的社会压力并扭转流域水资源面临的严重危机状态。

(2) 从承载压力指数分析可以看出,跨流域调水对缺水地区或经济中心城市的发展起到决定性作用。

从其他丰水区跨流域调水可以解决地区性缺水问题,进而解决水资源危机所带来的社会经济可持续发展问题。跨流域调水工程的建设,可以增加受水区的水资源可利用量,从而使缺水地区或经济中心城市的水量得到一定的补充调节,能有效保障地区水资源系统对社会经济和生态环境的支撑能力。

同时,跨流域调水也能调整受水区水资源利用结构不合理现状,提高用水效率。陕西农业用水占总用水量 63.4%,占比较大。调整灌溉用水方式,提高农业用水效率,从而提高陕西省用水效率。关中地区地处平原,作为主要的农灌分布区同时又是陕西省人口密集区及工业聚集区,是跨流域调水的主要受水区,引汉济渭工程建设对于未来关中地区社会经济发展有重大意义。跨流域调水以满足农业用水需求,从而实现地区水资源利用结构更高效合理。

基于水资源的自然资源属性,以流域为单位进行研究,将水资源与社会经济发展的需求合理配置,其研究结果更符合自然规律,有利于实现水资源的合理均衡和分配。

参考文献(References)

[1] 王永兴,陈曦. GIS 支撑下的干旱区水资源及其利用的空间分异研究[J]. 干旱区地理,2003,26(2):110 - 115. [WANG Yongxing,CHEN Xi. Study on spatial differentiation of water resources and their utilization in arid land based on GIS[J]. Arid Land Geography,2003,26(2):110 - 115.]

[2] 夏军,朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报,2002,(3):262 - 269. [XIA Jun,ZHU Yizhong. The measurement of water resources security:A study and challenge on water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources,2002,(3):262 - 269.]

[3] 屈小娥. 陕西省水资源承载力综合评价研究[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(2):91 - 97. [QU Xiao'e. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Shaanxi Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2017,31(2):91 - 97.]

[4] 刘佳骏,董锁成,李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报,2011,26(2):258 - 269. [LIU Jiajun,DONG Suocheng,LI Zehong. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources,2011,26(2):258 - 269.]

[5] OKI Taikan. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science,2006,313(5790):1068 - 1072.

[6] MEKONNEN M M,HOEKSTRA A Y. Four billion people facing severe water scarcity[J]. Science Advances,2016,2(2):e1500323 - e1500323.

[7] 苏贤保,李勋贵,刘巨峰,等. 基于综合权重法的西北典型区域水资源脆弱性评价研究[J]. 干旱区资源与环境,2018,32(3):112 - 118. [SU Xianbao,LI Xungui,LIU Jufeng,et al. Vulnerability assessment of water resources in the northwest typical area based on comprehensive weighting method[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2018,32(3):112 - 118.]

[8] 苏贤保,李勋贵,赵军峰. 水资源 - 水环境阈值耦合下的水资源系统承载力研究[J]. 资源科学,2018,40(5):1016 - 1025. [SU Xianbao,LI Xungui,ZHAO Junfeng. Carrying capacity of water resources system coupling water resources with water environment thresholds[J]. Resources Science,2018,40(5):1016 - 1025.]

[9] 黄秋森,赵岩,许新宜,等. 基于弹簧模型的资源环境承载力评价及应用——以内蒙古自治区陈巴尔虎旗为例[J]. 自然资源学报,2018,33(1):173 - 184. [HUANG Qiusen,ZHAO Yan,XU

Xinyi,et al. Evaluation of resources and environmental carrying capacity based on spring model:Taking Chen Barag Banner in Inner Mongolia as an example[J]. Journal of Natural Resources,2018,33(1):173－184.]

[10] LEI Kampeng,ZHOU Shaoqi. Per capita resource consumption and resource carrying capacity: A comparison of the sustainability of 17 mainstream countries[J]. Energy Policy,2012,42:603－612.

[11] REN Chongfeng,GUO Ping,LI Mo,et al. An innovative method for water resources carrying capacity research:Metabolic theory of regional water resources[J]. Journal of Environmental Management,2016,167:139－146.

[12] WIDODO B,LUPYANTO R,SULISTIONO B,et al. Analysis of environmental carrying capacity for the development of sustainable settlement in Yogyakarta urban area[J]. Procedia Environmental Sciences,2015,28:519－527.

[13] KOOP S H R,VAN LEEUWEN C J. Assessment of the sustainability of water resources management:A critical review of the city blueprint approach[J]. Water Resources Management,2015,29(15):5649－5670.

[14] 王丽霞,任志远,刘招,等. 基于 GIS 的陕西省水资源潜力及承载力研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(8):97－102. [WANG Lixia,REN Zhiyuan,LIU Zhao,et al. Water resources development potential and carrying capacity in Shaanxi Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2013,27(8):97－102.]

[15] 张军,周冬梅,张仁陟. 黑河流域 2004—2010 年水足迹和水资源承载力动态特征分析[J]. 中国沙漠,2012,32(6):1779－1785. [ZHANG Jun,ZHOU Dongmei,ZHANG Renzhi. Dynamic characteristics of water footprint and water resources carrying capacity in Heihe River basin during 2004－2010[J]. Journal of Desert Research,2012,32(6):1779－1785.]

[16] 张靖琳,陈学亮,徐世琴. 河西走廊中段临泽绿洲水资源供需平衡及承载力分析[J]. 干旱区地理,2018,41(1):38－47. [ZHANG Jinglin,CHEN Xueliang,XU Shiqin. Regional supply-demand balance and carrying capacity of water resources for Linze Oasis in the middle of Hexi Corridor[J]. Arid Land Geography,2018,41(1):38－47.]

[17] 戴明宏,王腊春,魏兴萍. 基于熵权的模糊综合评价模型的广西水资源承载力空间分异研究[J]. 水土保持研究,2016,23(1):193－199. [DAI Xiaohong,WANG Lachun,WEI Xingping. Spatial difference of water resource carrying capacity of Guangxi using fussy comprehensive evaluation model based on entropy weight method[J]. Research of Soil and Water Conservation,2016,23(1):193－199.]

[18] 许朗,黄莺,刘爱军. 基于主成分分析的江苏省水资源承载力研究[J]. 长江流域资源与环境,2011,20(12):1468. [XU Lang,HUANG Ying,LIU Aijun. Study on the carrying capacity of water resources in Jiangsu Province based on the principal component analysis[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2011,20(12):1468.]

[19] 杜俊平,叶得明,陈年来. 基于可拓综合评价法的干旱区水资源承载力评价——以河西走廊地区为例[J]. 中国农业资源与区划,2017,38(12):56－63. [DU Junping,YE Deming,CHEN Nianlai. Evaluation of water resources carrying capacity in arid area based on extension comprehensive evaluation method:A case study in Hexi Corridor[J]. China Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2017,38(12):56－63.]

[20] 杨雪梅,杨太保,石培基,等. 西北干旱地区水资源－城市化复合系统耦合效应研究——以石洋河流域为例[J]. 干旱区地理,2014,37(1):19－30. [YANG Xuemei,YANG Taibao,SHI Peiji,et al. Coupling effect of water resources－urbanization composite system in northwest arid region of China:A case of Shiyang River Basin[J]. Arid Land Geography,2014,37(1):19－30.]

[21] 任怡,王义民,畅建霞,等. 陕西省水资源供求指数和综合干旱指数及其时空分布[J]. 自然资源学报,2017,(1):139－153. [REN Yi,WANG Yimin,CHANG Jianxia,et al. The spatial and temporal distribution of drought in Shaanxi Province[J]. Journal of Natural Resources,2017,(1):139－153.]

[22] 王美霞,任志远,王永明,等. 基于 GIS 的关中－天水经济区水资源承载力评价[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(6):222－227. [WANG Meixia,REN Zhiyuan,WANG Yongming,et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on GIS techniques in Guanzhong-Tianshui Economic Zone[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2010,28(6):222－227.]

[23] ZHANG Xue,ZHAO Xuan,ZHANG Meng,et al. Safety evaluation of an artificial groundwater recharge system for reclaimed water reuse based on bioassays[J]. Desalination,2011,281:185－189.

[24] 段新光,栾芳芳. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(增刊1):119－122. [DUAN Xinguang,LUAN Fangfang. Evaluation of water resources carrying capacity in Xinjiang based on fuzzy comprehensive model[J]. China Population, Resources and Environment,2014,24(S1):119－122.]

[25] 郭倩,汪嘉杨,张碧. 基于 DPSIRM 框架的区域水资源承载力综合评价[J]. 自然资源学报,2017,32(3):484－493. [GUO Qian,WANG Jiayang,ZHANG Bi. Comprehensive evaluation of the water resource carrying capacity based on DPSIRM[J]. Journal of Natural Resources,2017,32(3):484－493.]

[26] 夏军,左其亭. 我国水资源学术交流十年总结与展望[J]. 自然资源学报,2013,28(9):1488－1497. [XIA Jun,ZUO Qiting. China's decade summary and prospect of water resources academic exchange[J]. Journal of Natural Resources,2013,28(9):1488－1497.]

[27] 陈伊多,杨庆媛,杨人豪,等. 基于熵权物元模型的土地生态安全评价——重庆市江津区实证[J]. 干旱区地理,2018,41(1):185－194. [CHEN Yiduo,YANG Qingyuan,YANG Renhao,et al. Evaluation of land ecological security based on entropy weighted matter-element model:A case of Jiangjin District, Chongqing[J]. Arid Land Geography,2018,41(1):185－194.]

[28] 夏富强,唐宏,杨德刚,等. 绿洲城市水资源压力及其对城市发展的影响——以乌鲁木齐为例[J]. 干旱区地理,2014,37(2):380－387. [XIA Fuqiang,TANG Hong,YANG Degang,et al. Water resources pressure of oasis city and its impact on urban development[J]. Arid Land Geography,2014,37(2):380－387.]

[29] 伍文琪,罗贤,黄玮,等. 云南省水资源承载力评价与时空分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(7):1517－

1524.［WU Wenqi, LUO Xian, HUANG Wei, et al. Research on the water resources carrying capacity and its temporal-spatial distribution characteristics in Yunnan Province, China［J］. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(7): 1517－1524.］

［30］曹丽娟,张小平.基于主成分分析的甘肃省水资源承载力评价［J］.干旱区地理,2017,40(4):906－912.［CAO Lijuan, ZHANG Xiaoping. Assessment of water resources carrying capacity in Gansu Province based on principal component analysis［J］. Arid Land Geography, 2017, 40(4): 906－912.］

Water resources carrying capacity in Shaanxi Province at the scales of watersheds

XIA Wei-jing[1,2], WANG Ning-lian[1,2], SHEN Yue[3]

(1 *Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an* 710127, *Shaan xi, China*;
2 *Northwest University, China Institute of Earth Surface System and Hazards, Xi'an* 710027, *Shaan xi, China*;
3 *Xi'an Jiaotong University, College of public policy and management, Xi'an* 710049, *Shaan xi, China*)

Abstract: Water resources carrying capacity is a critical index that is used to measure sustainable social and economic development in the arid and semi-arid regions. Taking nine basins of Shaanxi Province, China as evaluation units, this paper constructed a comprehensive evaluation model of water resources carrying capacity from two aspects of the macro index and comprehensive index, respectively, to reflect the size, carrying status, and coordination status of water resources carrying capacity. Macro index refers to the economic pressure index and the population pressure index. The comprehensive index refers to the carrying pressure index and the coordination index, which are calculated by constructing an index system that covers water resources, socio-economic and ecological indexes. Finally, through the analysis of the economic pressure index, population pressure index, carrying pressure index, and coordination index, this paper evaluates and discusses the water resources carrying capacity and the spatio-temporal distribution characteristics of various basins in Shaanxi Province. The results showed that 1) the water resources of various basins in Shaanxi Province are unevenly distributed and water resources carrying capacity varies significantly, being maximum in southern Shaanxi and minimum in northern Shaanxi and Guanzhong. The Hanjiang River and Jialing River basins in southern Shaanxi are rich in water and rich in precipitation, and the water resources carrying capacity ($WI < 0.6$) is in a suitable state. However, the water resources utilization efficiency in these two basins is relatively low ($HI < 0.6$), and the water consumption per capita, per ten thousand Yuan of GDP, and per mu of farmland irrigation were all higher than the provincial average. Water scarcity and water quality issues threaten the basins of Hekou-Longmen, Inland area, and Beiluo River in northen Shaanxi ($1.20 < WI < 1.50$). In addition, the water resources carrying capacity is in a state of mild overload. With population and economic growth, the four river basins of the Weihe River, Jing River, Longmen-Sanmenxia, and Yiluo River in Guanzhong region have problems on water supply and demand. Although these resources account for 61.75% of the provincial population theoretically, they can only serve 18.52% of the total province. The comprehensive evaluation index value of water resources carrying capacity is greater than 1.5, which is in a severe overload state, 2) from the analysis of carrying pressure index, it can be seen that the inter-basin water transfers play a decisive role in the development of water-deficient areas and economic centers. As can be seen from Figure 2, the water consumption of the three basins in the Guanzhong region is greater than their total water resources. In other words, inter-basin water transfers from water-rich basins can solve the regional water shortage problem, and then solve the socio-economic issues of sustainable development caused by water crisis, and 3) based on the natural resource attributes of water resources, the results of research conducted on the basin, as an evaluation unit, were essentially in line with the laws of nature, contributing to the realization of rational balance and distribution of water resources.

Key words: water resource carrying capacity; water resource; Shaanxi province; basin